

ЭНТАЛЬПИЙНЫЙ ПОДХОД В ИССЛЕДОВАНИИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ НАГРЕВЕ ОТЛОЖЕНИЙ В КОАКСИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

М.А.Фатыхов, Л.М. Фатыхов, С.Б.Шагапов

Башкирский государственный педагогический университет им.М.Акумлы, г.Уфа, Россия

Нагрев нефтепродуктов высокочастотными электромагнитными волнами является эффективным методом объемного разогрева. Современные исследования показали его эффективность в различных условиях применения [1, 2]. Цель работы заключается в изучении динамики плавления смоло-парафиновых пробок в насосно-компрессорной трубе (НКТ) и межтрубном пространстве нефтяной скважины высокочастотным электромагнитным излучением. При этом межтрубное пространство образуется между внешней поверхностью насосно-компрессорной трубы и внутренней поверхностью обсадной колонны. Такая задача возникает при разработке технологии очистки нефтяных и нефтегазовых скважин от различных отложений (например, асфальто-смолистых веществ, парафинов, газогидратов и др.). Решение её представляет важную народно-хозяйственную задачу, так как асфальто-смолистые и парафиновые отложения (АСПО) содержатся в составе нефти почти во всех нефтедобывающих районах РФ [3, 4].

Физической основой применения рассматриваемого метода плавления отложений в скважине является преобразование части электромагнитной энергии в межтрубном пространстве в тепло вследствие конечной электропроводности материалов труб и диэлектрических потерь среды, заполняющей межтрубное пространство.

Для исследования поставленной задачи решается уравнение энергии

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(r, z), \quad (1)$$

удовлетворяющее начальным и граничным условиям

$$\begin{cases} T = T_1 = const \text{ при } r < r_3, \\ T = T_2(z) \text{ при } r > r_3, \end{cases} \quad (2)$$

$$z = 0 \begin{cases} \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \text{ } r \leq r_3, \\ T = T(t) \text{ } r > r_3, \end{cases} \quad (3)$$

$$z = H \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

$$r = R \quad T = T_2(z) \quad (5)$$

Кроме того, в зонах, где возможен фазовый переход (плавление смоло-парафиновой пробки внутри НКТ и в межтрубном пространстве) записываются вспомогательные соотношения для энтальпии:

$$h = \begin{cases} c_s T, & T < T_m, \\ c_s T_m + f\chi, & T = T_m, \\ c_s T_m + \chi + c_l (T - T_m), & T > T_m \end{cases} \quad (6)$$

Предположим, что в межтрубное пространство скважины соответствующим образом вводится энергия ВЧ электромагнитного излучения от генератора, установленного на устье. Начиная с устья скважины, пробка заполняет НКТ и межтрубное пространство. Скважина обсажена цементным кольцом и кондуктором. Последний обсажен также цементной стяжкой, ограниченной горными породами (рис.1).

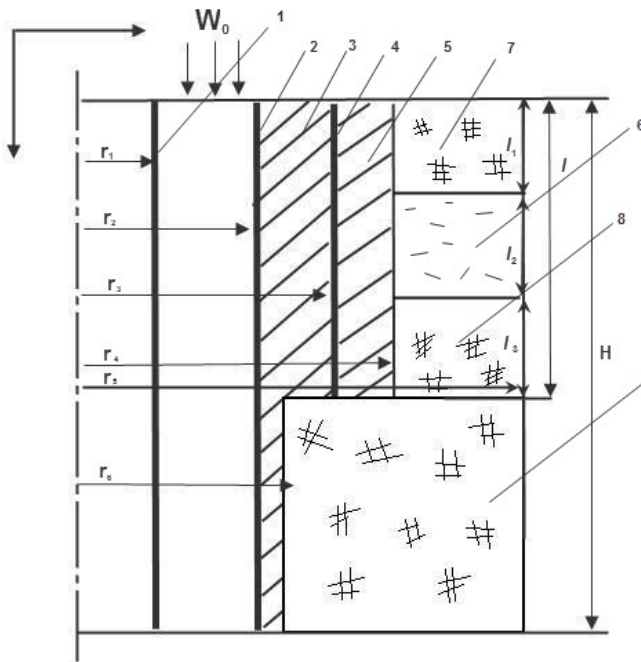


Рис. 1 – Схема разреза скважины
1 – НКТ, 2 – обсадная колонна; 3, 5 – цементное кольцо, 4 – кондуктор, 6 – зона вечной мерзлоты; 7, 8, 9 – горные породы.
 $r_1=0,0365$ м, $r_2=0,065$ м, $r_3=0,011435$ м, $r_4=0,15$ м, $r_5=1,5$ м, $r_6=0,1$ м, l – высота кондуктора, l_1 – толщина зоны мерзлоты, l_2 – толщина зоны мерзлоты, l_1 и l_2 – толщины ниже и выше лежащих горных пород

Расплавленный смоло-парафин по своим диэлектрическим свойствам незначительно отличается от твердого смоло-парафина. Этот эффект позволяет записать следующие выражения для $Q(r,z)$:

на внешней поверхности НКТ

$$Q_2 = \frac{N_0}{2L_2^{(e)} \pi r_2} \exp\left(-\frac{z}{L^{(e)}}\right) \delta(r - r_2), \quad (7)$$

в среде, заполняющей межтрубное пространство,

$$Q_{23} = \frac{N_0}{2L_s^{(e)} \pi r^2 \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} \exp\left(-\frac{z}{L^{(e)}}\right), \quad (8)$$

на внутренней стенке обсадной колонны

$$Q_3 = \frac{N_0}{2L_3^{(e)} \pi r_3} \exp\left(-\frac{z}{L^{(e)}}\right) \delta(r - r_3), \quad (9)$$

где $\frac{1}{2L_{(e)}} = \frac{1}{2L_2^{(e)}} + \frac{1}{2L_s^{(e)}} + \frac{1}{2L_3^{(e)}}$.

Для решения уравнения (1) достаточно задавать начальные и граничные условия в виде (2) – (5), а не равенство тепловых потоков на границах сред. В этом преимущество энтальпийного метода.

Поставленная задача решалась численно методом контрольного объема.

Число узлов сетки по координате z – 60, по r – 30. Расчетная схема бралась равномерной по продольной координате и существенно неравномерной по радиальной координате. Неравномерность по последней координате связана с необходимостью прохождения зон с разными теплофизическими характеристиками: смоло-парафин, металлические трубы, зоны цементного кольца и стяжки, окружающая скважину горная порода.

Поставленная задача решалась также с использованием схемы с фиксированным шагом по времени и дробными пространственными шагами при определении положения границы раздела фаз. Результаты этих двух независимых методов численных решений рассматриваемой задачи существенно не отличаются.

В таблице 1 представлены основные электрофизические параметры сред (НКТ, обсадной колонны и среды, заполняющей межтрубное пространство), мощности электромагнитного поля, влияющие на разогрев отложений и время появления продуктов расплавления их в скважине.

Таблица 1

Физические характеристики сред

Среда	ρ , кг/м ³	c , Дж / кг · К	λ , Вт / м · К	χ , Дж / кг	f
Твердый смоло-парафин	680	2880	0,38	520000	-
Жидкий смоло-парафин	840	1920	0,12	-	1
Металл	7800	400	50	-	-
Цементное кольцо	2000	840	1,28	-	-
Мерзлая порода	1700	1098	2,41	336000	-
«Жидкая мерзлая» порода	800	1443	2,16	-	0,15
Грунт	1700	1443	2,16	-	-

Считалось, что высота пробки равна 800 м, коэффициенты затухания энергии электромагнитных волн α ($\alpha = 0,5L^{(e)}$) на стенках НКТ и обсадной колонны были равны соответственно $6,22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$ и $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$.

Расчеты проводились до достижения температуры, не превышающей 100°C в любой точке расчетной схемы.

Исследования показали, что наибольший рост температуры первоначально достигается внутри среды, находящейся в межтрубном пространстве, в дальнейшем этот максимум смещается в сторону внешней стенки НКТ. В пробке, заключенной внутри НКТ, значение температуры наибольшее на внутренней стенке НКТ и монотонно убывает к середине скважины. С увеличением продолжительности нагрева проявляется тенденция выравнивания температуры по радиусу и достижения температуры плавления смоло-парафиновой пробки внутри НКТ.

В рамках описанной математической модели результаты исследований показали, что на разогрев и динамику плавления смоло-парафиновой пробки существенно влияют длина зоны поглощения энергии высокочастотного электромагнитного излучения в межтрубном пространстве, мощность электромагнитного поля, электрофизические свойства сред, заполняющих межтрубное пространство, начальные условия в средах, окружающих скважину.

Таблица 2

Основные параметры, влияющие на время достижения температуры плавления смоло-парафиновой пробки в скважине

№	$L_{(e)}, \text{ м}$	$W_0, \text{ кВт}$	$\alpha, \text{ м}^{-1}$	$t_{\text{п,А}}, \text{ с}$	$t_{\text{п,К}}, \text{ с}$	$t_{\text{п,С}}, \text{ с}$	$t_{\text{п,М}}, \text{ с}$
1	500	60	$4,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$	720	2880	720	3120
2	16.1	60	0,03	480	-	240	-
3	16,1	15	0,03	1440	-	960	-
4	16,1	2	0,03	6960	-	6480	-
5	500	60	$4,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$	720	2880	720	3120
6	500	40	$4,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$	960	4800	960	5280
7	525	60	0	480	2160	x	x

Здесь вариант №1 соответствует наличию зоны мерзлоты, варианты 2 – 7 рассчитаны при начальной температуре грунта, равной 15°C , и отсутствии зоны мерзлоты. Знак «-» означает, что за расчетное время в этих точках температура плавления не достигнута. Знак «x» соответствует случаю заполнения межтрубного пространства воздухом или углеводородным газом. Последние 4 столбца характеризуют времена достижения температуры плавления отложения в соответствующих точках, указанных на рис. 1.

Из рис.2 видно, что при плавлении смоло-парафиноотложений в скважине образуются не поверхности нулевой толщины, а целая область, в которых сохраняется постоянная температура плавления смоло-парафина. Следовательно. Процесс плавления смоло-парафина в скважине имеет объемный характер. Область плавления отложения разделяет межтрубное пространство на две зоны: зону твердого смоло-парафина и жидкого смоло-парафина. Объем этой области со временем в этом пространстве растет. Одновременно увеличивается зона, занятая жидким смоло-парафином, и уменьшается объем твердого смоло-парафина. Область объемного плавления (назовем переходной зоной) в НКТ отсутствует. Следовательно, появление этой переходной зоны обуславливается наличием распределенных источников тепла.

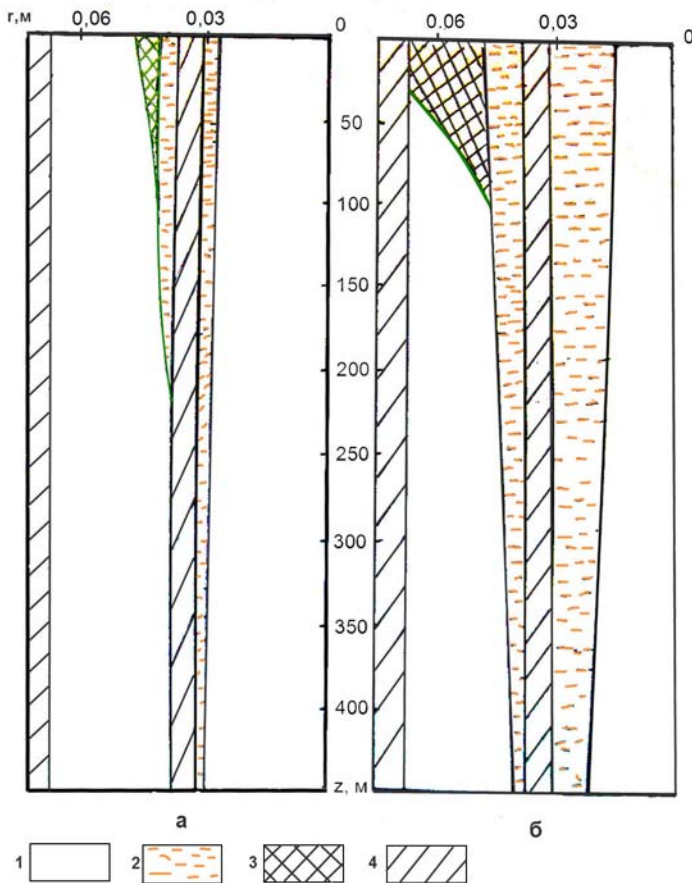


Рис. 2 – Изотермы плавления при наличии вечной мерзлоты: *a* – 3600 с, *б* – 10800 с. 1 – твердое отложение, 2 – жидкий смоло-парафин, 3 – переходная зона, 4 – стальные трубы

Результаты расчетных исследований показывают, что:

- размеры переходной зоны зависят от вышеперечисленных параметров;
- эффективность плавления (отношения количества жидкого смоло-парафина к затраченной энергии) может составить отношения семи к единице;
- наибольшее влияние зоны «вялой» вечной мерзлоты сказывается в динамике разогрева и плавления пробки в межтрубном пространстве, интенсивность нагрева и плавления этой зоны существенно снижается при наличии цементного кольца, цементной стяжки и кондуктора

Обозначения

Q – интенсивность распределенных источников тепла, Вт/м³; r_3 – внутренний радиус обсадной колонны, м; r_2 – внешний радиус НКТ, м; H – высота пробки, м; R – внутренний радиус расчетной схемы, м; χ – теплота фазового перехода, Дж/кг; T – температура, К; r, z – цилиндрические координаты, м; t – время, с; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; $L^{(e)}, L_2^{(e)}, L_s^{(e)}, L_3^{(e)}$ – длина зоны поглощения ВЧ электромагнитной энергии в межтрубном пространстве, в материале НКТ, обсадной колонны, среде, заполняющей межтрубное пространство, соответственно, м; N_0 – мощность ВЧ электромагнитного излучения на устье скважины, Вт; f – доля расплавленной фазы в двухфазном объеме, $\delta(r)$ – функция Дирака. Индексы s и l относятся к твердому и жидкому состоянию вещества, m – к температуре фазового перехода.

Литература

1. Балакирев В.А., Сотников С.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. Микроволновые методы интенсификации добычи нефти (Обзор) // Электромагнитные явления. 2001. Т. 2. № 2 (6). С.255– 288.
2. Морозов Н.Н., Кашкатенко Г.В. Микроволновой разогрев нефтепродуктов в трубопроводах // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13. № 4/2. С. 974 – 976.
3. Мурзагулов В.Р. Совершенствование эксплуатации добывающих скважин и нефтегазовых шлейфов в условиях образования парафиногидратных отложений (на примере Ямбургского газоконденсатного месторождения): Автореф. дис. канд техн. наук. - Уфа, 2011. 23 с.
4. Былков В.В. Эксплуатация скважин в условиях интенсивного образования АСПО // Нефтегазовая вертикаль,. 2006. №2. С. 44–45.